Evaluar el potencial de los microorganismos en la biorremediación y restauración de suelos afectados por incendios forestales. Revisión sistemática

Autor
Yulian Daniela Vergara Rodriguez

Título por el que opta
Microbiologa

Director
Fabian Felipe Fernandez Daza
Biologo M.Sc; D.Sc

Grupo de Investigación
GIMIA
Semillero de microbiología ambiental

Línea de Investigación
Microbiología ambiental

Facultad de ciencias básicas
Programa de microbiología
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2025

IMPACTOS

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Alternativas biotecnológicas de bajo costo para la restauración de suelos	Agricultores, comunidades rurales, entes ambientales
Responsabilidad social	Propuesta de restauración sostenible enfocada en procesos naturales	Comunidades afectadas por incendios, organizaciones ambientales
Científico	Revisión sistemática con evidencia argumentada sobre biorremediación microbiana post-fuego	Investigadores en microbiología ambiental, ecología y restauración del suelo
Indicadores de gestión	Propuesta de indicadores edáficos para evaluar restauración con microorganismos	Proyectos de gestión ambiental en restauración de suelos perturbados y, políticas públicas ambientales
Tecnológico	Desarrollo biotecnológico de bioformulados microbianos y sus aplicaciones	Centros de investigación, universidades, empresas de bioinsumo
Técnico	Orientación para la formulación y aplicación de consorcios microbianos	Investigadores en manejo de suelos y restauración ecológica
Ambiental	Estrategias microbiológicas para recuperar las funciones ecosistémicas del suelo	Ecosistemas perturbados y degradados, autoridades de gestión ambiental, ONGs conservacionistas
Social	Incentivación del uso de tecnologías sostenibles en zonas desprotegidas	Comunidades rurales, población académica, entes territoriales
Cultural	Articulación del conocimiento científico con prácticas de manejo comunitario	Conocimientos locales de poblaciones campesinas e indígenas que interactúan con los territorios

EVALUAR EL POTENCIAL DE LOS MICROORGANISMOS EN LA BIORREMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SUELOS AFECTADOS POR INCENDIOS FORESTALES

Vergara Rodriguez Yulian Daniela[1] (yulianvergara00@usc.edu.co)

[1]Grupo de Investigación GIMIA, Programa de Microbiología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

Los incendios forestales, son eventos cada vez más frecuentes, los cuales generan impactos significativos sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, afectando gravemente la microbiota edáfica y, con ello, la funcionalidad de algunos procesos ecosistémicos clave. Esta revisión sistemática analizó el potencial de los microorganismos en la biorremediación de suelos afectados por incendios forestales, integrando evidencias científicas sobre los mecanismos microbianos involucrados en la restauración ecológica. Para esto, se empleó la metodología PRISMA seleccionando estudios publicados entre 2005 y 2025, utilizando las bases de datos: Scopus, ScienceDirect, Google Academy y Scielo. Se incluyeron investigaciones experimentales, revisiones sistemáticas y estudios de campo en inglés y español. Los resultados indicaron que los incendios reducen drásticamente la biomasa y diversidad microbiana; modificando parámetros como el pH, la relación C:N y la actividad enzimática del suelo. Asimismo, se identificaron géneros bacterianos (*Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*), hongos micorrízicos, cianobacterias y consorcios microbianos con funciones claves en la biorremediación y restauración de suelos post-incendio, mediante mecanismos como la fijación de nitrógeno, la degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos, la estabilización de la estructura del suelo y la promoción de crecimiento vegetal. Las estrategias de bioaumentación y bioestimulación mostraron ser eficaces en la aceleración de la recuperación del suelo post-incendio en ambientes controlados, logrando mejoras en la estabilidad superficial del ecosistema edáfico en apenas 15 días, en comparación a procesos de atenuación natural que pueden tardar más de 20 años.Sin embargo, su aplicación en campo aún presenta desafíos relacionados con la persistencia y viabilidad del inoculante y las condiciones ambientales. En conclusión el uso de microorganismos representa una alternativa viable y sostenible para la restauración de suelos degradados con un alto potencial de escalabilidad si se adaptan a las condiciones ecológicas locales. No obstante su efectividad no es uniforme para todos los tipos de suelo, dado que factores como la textura, la fertilidad, microbiota nativa y los antecedentes de perturbación influyen significativamente en la respuesta del tratamiento. Por ello, se requiere profundizar en la comprensión de sus interacciones y avanzar en el estudio de bioformulados bajo condiciones naturales y distintos contextos edáficos.

Palabras clave: *Biorremediación; incendios forestales; microorganismos del suelo; restauración ecológica; suelos degradados, ecosistema edáfico.*

EVALUATE THE POTENTIAL OF MICROORGANISMS IN THE BIOREMEDIATION AND RESTORATION OF SOILS AFFECTED BY FOREST FIRES

ABSTRACT

Wildfires are increasingly frequent events, which generate significant impacts on the physicochemical and biological properties of the soil, severely affecting the soil microbiota and, consequently, the functionality of some key ecosystem processes. This systematic review analyzed the potential of microorganisms in the bioremediation of soils affected by wildfires, integrating scientific evidence on the microbial mechanisms involved in ecological restoration. For this purpose, the PRISMA methodology was used, selecting studies published between 2005 and 2025, using the following databases: Scopus, ScienceDirect, Google Academy, and Scielo. Experimental research, systematic reviews, and field studies in English and Spanish were included. The results indicated that fires drastically reduce microbial biomass and diversity, modifying parameters such as pH, C:N ratio, and enzymatic activity in the soil. Likewise, bacterial genera (Bacillus, Pseudomonas, Rhizobium), mycorrhizal fungi, cyanobacteria, and microbial consortia were identified with key functions in post-fire soil bioremediation and restoration, through mechanisms such as nitrogen fixation, polycyclic aromatic hydrocarbon degradation, soil structure stabilization, and plant growth promotion. Bioaugmentation and biostimulation strategies have proven effective in accelerating post-fire soil recovery in controlled environments, achieving improvements in the surface stability of the soil ecosystem in just 15 days, compared to natural attenuation processes that can take more than 20 years. However, their field application still presents challenges related to the persistence and viability of the inoculant and environmental conditions. In conclusion, the use of microorganisms represents a viable and sustainable alternative for the restoration of degraded soils with high scalability potential if adapted to local ecological conditions. However, their effectiveness is not uniform for all soil types, given that factors such as texture, fertility, native microbiota, and disturbance history significantly influence treatment response. Therefore, a deeper understanding of their interactions is required, as is progress in the study of bioformulations under natural conditions and different soil contexts.

Keywords: *Bioremediation; forest fires; soil microorganisms; ecological restoration; degraded soils; soil ecosystem.*

HIGHLIGHTS

1. Fire-affected soils show a significant reduction in microbial biomass and diversity, affecting enzymatic activity and disrupting their essential ecological functions.

2. Key microbial genera identified for soil restoration include Bacillus, Pseudomonas, Rhizobium, and cyanobacteria such as Nostoc and Scytonema.

3. Bioformulated products using microbial consortia (bacteria, fungi, and cyanobacteria) improve nutrient cycling and plant growth under controlled conditions.

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son perturbaciones ambientales que, si bien forman parte de ciertos ciclos ecológicos naturales, se han intensificado en frecuencia y severidad como consecuencia del cambio climático y la intervención antrópica (Westerling et al., 2006; Singleton et al., 2019). Estos eventos, en especial aquellos de mediana y alta intensidad, impactan significativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, comprometiendo su funcionalidad ecológica y dificultando los procesos de atenuación natural (Certini, 2005; Mataix-Solera et al., 2009). Entre los efectos críticos se encuentra la pérdida de biomasa microbiana, el desequilibrio de nutrientes esenciales como el carbono y nitrógeno, el aumento del pH por acumulación de cenizas y la presencia de compuestos tóxicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), dioxinas y metales pesados (Fontúrbel et al., 2012; Kim et al., 2011).

Estas alteraciones afectan de manera directa la viabilidad y diversidad de las comunidades microbianas del suelo, interfiriendo en los ciclos biogeoquímicos y en los mecanismos naturales de regeneración del ecosistema edáfico (Muñoz-Rojas et al., 2021; Hu et al., 2023). Si bien la atenuación natural puede contribuir a la recuperación del suelo a largo plazo, se trata de un proceso lento, incierto y dependiente de múltiples factores ambientales tales como, la frecuencia e intensidad del incendio, clima local, actividad del agua en los suelos, las características fisicoquímicas del suelo incluyendo su textura, contenido de materia orgánica y microbiota nativa. Frente a este escenario, el enfoque biotecnológico basado en el uso de microorganismos (bacterias, hongos y cianobacterias) ha ganado relevancia por su capacidad de acelerar y direccionar la restauración de suelos degradados.

Diversas investigaciones han evidenciado que ciertas especies microbianas poseen la capacidad de degradar contaminantes, fijar nutrientes esenciales, restablecer funciones metabólicas del suelo y contribuir a la recuperación de su estructura, fertilidad y el establecimiento de la vegetación (Pizarro-Tobías et al., 2015; Chamizo et al., 2020). A diferencia de la atenuación natural, estas estrategias permiten intervenir activamente el sistema edáfico, promoviendo una recuperación más eficiente, controlada y sostenible. En este contexto, entre las principales estrategias biotecnológicas se destacan la bioaumentación, que consiste en la introducción dirigida de cepas con funciones específicas,

y la bioestimulación, que optimiza las condiciones del suelo para favorecer el crecimiento de la microbiota nativa (Andreolli et al., 2015; El Fantroussi & Agathos, 2005). Ambas se han perfilado como alternativas de bajo impacto ambiental con un alto potencial de aplicación en la restauración de los suelos post incendio.

La presente revisión sistemática tiene como objetivo general analizar el potencial de los microorganismos en la biorremediación de suelos afectados por incendios forestales. Integrando las evidencias existentes sobre los efectos de los incendios forestales en las propiedades biológicas afectadas con énfasis en la microbiota de los suelos y evaluar el potencial de los microorganismos en la biorremediación como herramienta para su restauración. Este análisis permitirá identificar enfoques efectivos para mitigar los impactos negativos de los incendios y restaurar la funcionalidad de los suelos afectados.

2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL: Analizar el potencial de los microorganismos en la biorremediación de los suelos afectados por incendios forestales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Describir las afectaciones de los incendios forestales sobre las propiedades biológicas del suelo, y procesos ecosistémicos mediados por microorganismos.
- Identificar las especies de microorganismos con potencial en la biorremediación de suelos afectados por incendios forestales.
- Analizar las características asociadas a bioformulados de microorganismo con potencial para la biorremediación de suelos afectados por incendios forestales.

3. METODOLOGÍA

El siguiente caso de estudio se desarrolló siguiendo los lineamientos de la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), como guía para la planificación, ejecución y documentación del proceso de revisión (Page et al., 2021), garantizando la transparencia en la evaluación, reproducibilidad y rigurosidad científica. El proceso de selección de datos se realizó conforme a la declaración PRISMA construyendo un diagrama de flujo para describir las etapas de inclusión y exclusión de estudios orientada a atender o responder una inquietud específica (Rodríguez et al., 2015). Esta investigación propone realizar una revisión sistemática con documentos disponibles en bases de datos con el fin de responder a la siguiente pregunta **¿De qué manera los incendios forestales afectan los suelos al alterar sus propiedades biológicas, y como los microorganismos,**

mediante aplicaciones de biorremediación, pueden contribuir a la restauración de los suelos afectados?

3.1. Estrategia de búsqueda

La búsqueda de literatura se realizó en bases de datos académicas de alto impacto, estableciendo los criterios de búsqueda como: artículos, revistas ,informes, tesis, estudios., publicados entre los años 2005 hasta 2025 en los idiomas inglés y español considerando las bases de datos science direct, scopus, scielo y google academy; incluyendo las siguientes palabras claves:

- "Wildfire impact on soil properties"
- "Impact of forest fires on soil physicochemical properties"
- “Impact of forest fires on soil biological properties”
- "Microbial bioremediation of burned soils"
- "Soil restoration after forest fires"
- "Post-fire soil recovery using microorganisms"
- "Soil microorganisms and forest fire recovery"
- "Post-fire soil restoration and microbial communities"
- "Impact of forest fires on soil properties and microbial remediation"

3.2. Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión:

- Estudios que investigaron el impacto de los incendios forestales en las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos.
- Artículos que evaluaron el uso de microorganismos en la biorremediación de suelos afectados por incendios.
- Publicaciones en revistas indexadas y revisadas por pares.
- Estudios publicados en los últimos 20 años.
- Investigaciones experimentales, libros, informes, artículos, estudios de campo y revisiones sistemáticas relevantes.

Criterios de exclusión:

- Publicaciones que no abordaron directamente incendios forestales ni su impacto en los suelos.
- Artículos que estuvieron publicados antes del 2005.
- Artículos centrados exclusivamente en restauración vegetal o animal.
- Estudios no accesibles en texto completo.
- Investigaciones publicadas en idiomas distintos al inglés o español.

3.3. Proceso de selección de estudios

Para garantizar el rigor metodológico se aplicaron las directrices PRISMA en la selección, síntesis e identificación de los estudios revisados y seleccionados. Por lo cual para representar visualmente el proceso de exclusion e inclusion de los estudios se construyó un diagrama de flujos PRIMA; teniendo en cuenta consideraciones como: haber sido publicado a partir del año 2005, que describa la información necesaria para el desarrollo de la investigación, con datos cuantitativos y/o cualitativos; tesis de grados, articulos, libros, revistas, informes, estudios de campo, y revisiones sistemáticas, calidad del documento e investigaciones publicadas alrededor del mundo. Para los criterios de exclusión se considerarán estudios previos al 2005 y que no sean en inglés o español, publicaciones que no aborden la problemática de la investigación y que no tengan acceso al texto completo; el proceso se desarrolló en tres fases.

Fase 1: Cribado de títulos

- Se revisaron títulos y resúmenes para evaluar la pertinencia de los estudios frente a los criterios de inclusión establecidos.

Fase 2: Consideración de los estudios

- Los estudios potencialmente relevantes fueron leídos en texto completo. Se evaluó el cumplimiento de los criterios de inclusión y se descartaron aquellos que cumplían con los criterios de exclusión.

Fase 3: Selección de estudios

- Se seleccionaron los estudios finales, que constituyen el corpus de análisis para esta revisión sistemática.

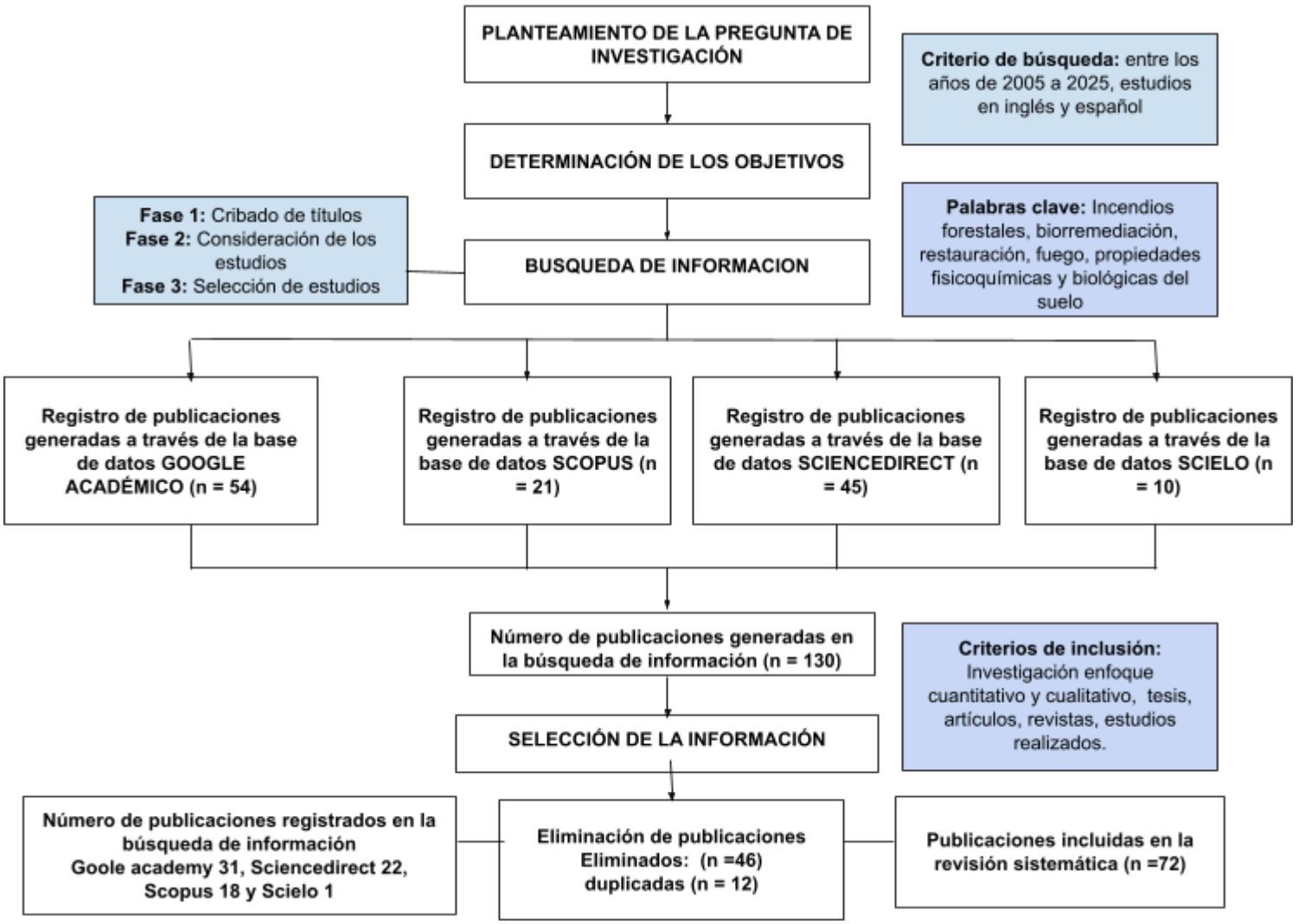


Figura **1.** Esquema de flujo selección de estudios.

Para cada estudio adicionalmente se evaluó la calidad de las fuentes incluidas, se consideraron criterios de indexación: índice h y/o factor de impacto de los estudios. Se clasificaron en alta, media o baja calidad, priorizando estudios publicados en revistas indexadas con revisión por pares y alto reconocimiento académico, para garantizar la confiabilidad y relevancia de la información, respaldando los resultados con evidencia proveniente de publicaciones con alto reconocimiento académico y rigor científico, lo que reduce sesgos metodológicos.

Tabla 1. Criterios para calificar la calidad de la fuente.

Calidad	Índice de impacto / indexación	Índice h	Características

Alta	Revista indexada con impact factor ≥ 2	h-index alto (> 40)	Revisión por pares estricta, editorial reconocida
Media	Revista indexada con impacto < 2	h-index moderado (15–40)	Revisión por pares, pero no top tier
Baja	No indexada en bases relevantes	h-index bajo (< 15) o sin registro	Revistas regionales, cuestionadas o de baja visibilidad

Fuentes: Los criterios de calidad se basan en estándares de JCR (Clarivate, 2023), Hirsch (2005) para el índice h, y COPE (2023) para buenas prácticas editoriales. Rangos de impacto siguen la categorización de Bornmann & Daniel (2007).

3.4. Extracción y análisis de datos

Para la extracción, análisis y ordenamiento de los estudios incluidos de forma sistemática y estandarizada se construyó una matriz general, para la extracción de información en Excel (Ver anexo 1, tabla 2), la cual permitió incluir todas las publicaciones seleccionadas de acuerdo con los criterios de inclusión, los datos extraídos para cada estudio seleccionado.

El proceso de extracción se realizó de manera doble, con dos revisores independientes (la autora principal y Daniela Castillo, investigadora de ingeniería ambiental), para garantizar la precisión y coherencia de los datos recogidos, resolviendo discrepancias mediante discusión consensuada. Posteriormente, la información se codificó y organizó para facilitar el análisis cualitativo buscando identificar patrones comunes, diferencias, tendencias y vacíos en la literatura. De igual manera se determinaron las variables específicas biológicas (microbiota nativa, biomasa microbiana) patrones recurrentes en el uso y eficacia de las especies microbianas en la restauración ecológica post-incendio.

3.5. Síntesis de resultados

Como parte de la estrategia metodológica, a partir de la matriz general de datos se realizaron dos nuevas matrices analíticas como herramientas fundamentales para organizar, categorizar, comparar y sintetizar la información obtenida de las fuentes seleccionadas. Dada la diversidad temática y el enfoque multidimensional del estudio, las matrices permitieron la estructuración de los datos, en función de los objetivos específicos, facilitando una lectura transversal y crítica de los estudios seleccionados.

3.5.1. Afectaciones de los incendios sobre las propiedades biológicas del suelo

Esta matriz (Ver anexo 2, tabla 3), clasifico los estudios de acuerdo con las variables afectadas (biomasa microbiana, respiración basal, diversidad microbiana, etc.), su importancia en la evaluación del suelo, método del análisis, y su importancia en los suelos degradados y afectados por incendios forestales; lo que permitió determinar los principales parámetros asociados a las afectaciones en las propiedades biológicas de los suelos, comparar enfoques y detectar vacíos metodológicos.

3.5.2. Especies microbianas con potencial biorremediador y restaurador

Esta matriz (Ver anexo 3, tabla 4) determino el potencial de biorremediación que tienen los microorganismos para restaurar los suelos afectados por incendios. Contiene el nombre de las especies o géneros microbianos reportados en diferentes formulaciones o de forma nativa, los mecanismos de acción en la biorremediación por parte de los microorganismos tales como fijación de nitrógeno, solubilización de fósforo, producción de biopelículas, entre otros; contaminantes degradados y/o nutrientes fijados y evidencia experimental en la restauración de los suelos afectados por incendios. Esta clasificación facilitó la identificación de organismos clave con potencial biotecnológico.

Los datos recopilados en la matriz (tabla 4), permitieron extraer información sobre los tipos de bioformulados utilizados en procesos de restauración de suelos afectados por el fuego. Entre los bioformulados encontrados se evidenciaron productos sólidos, líquidos, en polvo y extractos microbianos. Estas presentaciones facilitan la aplicabilidad dependiendo el contexto experimental: laboratorio (entorno altamente controlado), invernadero (entorno semicontrolado), viveros (entorno técnico) y campo (entorno natural), asuvez protege la viabilidad microbiana y/o asegura una liberación controlada del inóculo. Estos bioinsumos se componen de cepas bacterianas como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Burkholderia* y *Rhizobium*; hongos como *Trichoderma* y micorrizas arbusculares, así como cianobacterias del género *Nostoc* y *Scytonema* (Acea et al., 2005; Andreolli et al., 2015; Andreoli et al., 2015, 2021).

Las características de estos bioformulados varía según, su origen (nativo o comercial), finalidad de aplicación (inoculación directa, vía foliar o en sustrato) y su funcionalidad (biofertilización, mejora estructural, retención hídrica, fijación de nitrógeno o degradación de contaminantes), (Parra et al., 2020; Chamizo et al., 2012-2018; Andrade et al., 2017). Los métodos de aplicación varían según su propósito funcional: La inoculación directa facilita la colonización de la rizosfera y se adapta mejor al contexto de campo, invernadero o laboratorio; la vía foliar estimula respuesta vegetal sin depender el estado del suelo, siendo práctico en viveros e invernaderos; y la aplicación en sustrato optimiza la colonización de microorganismos en etapas iniciales bajo condiciones controladas. Por lo cual se construyó la matriz análisis de las características y aplicaciones de bioformulados microbianos en restauración de suelos incendiados (Ver anexo 4 tabla 5).

Todos los datos extraídos para la síntesis de resultados fueron analizados cualitativamente mediante una lectura crítica y comparativa, buscando identificar patrones comunes, diferencias, tendencias y vacíos en la literatura, relacionados con el potencial restaurador de los microorganismos en suelos post incendio.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

La presente revisión sistemática ha permitido un análisis integral sobre el potencial de los microorganismos en la biorremediación de suelos afectados por incendios forestales, abordando aspectos fundamentales desde el impacto inicial de los incendios sobre las propiedades biológicas del suelo, hasta la identificación y aplicación práctica de bioformulados microbianos en procesos de restauración. Los hallazgos revelan tanto avances significativos como brechas importantes que deben ser consideradas para optimizar las estrategias de recuperación ecológica post-incendios.

4.1 Afectaciones de los incendios sobre las propiedades biológicas del suelo.

En primer lugar, la afectación de los incendios sobre las propiedades biológicas del suelo y los procesos ecosistémicos mediados por microorganismos se confirma como un fenómeno complejo y multifactorial. Varios estudios coinciden que los incendios forestales ocasionan una reducción significativa de la biomasa y diversidad microbiana, involucrando procesos esenciales como la mineralización de materia orgánica, el ciclo de nutrientes y la simbiosis con plantas. Por ejemplo, Cáceres Lazo et al. (2022) reportaron pérdidas de hasta un 60 % en biomasa microbiana posterior de un incendios en suelos de páramo, junto con disminuciones en nitrógeno y fósforo disponibles. González et al. (2024), evidenciaron que bacterias benéficas como *Pseudomonas* y hongos micorrízicos se vieron especialmente afectados por este tipo de perturbaciones, reduciendo la capacidad de interacción mutualista en suelos volcánicos.

Brianne et al. (2020), demuestran una caída del 40 % en la actividad enzimática del suelo, en bosques templados durante el primer año posterior a un incendio, mientras que Mataix-Solera et al. (2009), registra reducciones similares en más del 50 % de la mineralización de nutrientes en clima mediterráneo. Por el contrario, Pereira et al. (2018), indican que, tras incendios de baja severidad, favorece temporalmente la colonización de microorganismos pioneros como especies de *Bacillus* y de cianobacterias, aunque esto depende de la severidad del fuego y el tipo de suelo.

Asimismo, se evidenció un aumento del pH del suelo entre 0.5 y 1.5 unidades (UND), con respecto a las condiciones iniciales, dado por la acumulación de cenizas ricas en cationes alcalinos (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} y Na^{+}), generados durante la combustión de materia orgánica (Mataix-Solera et al., 2009; Álvarez Andino et al., 2024). Este cambio altera la biodisponibilidad de nutrientes esenciales como hierro, fósforo y manganeso, afectando negativamente las comunidades microbianas mesofílicas y acidófilas. En suelos naturalmente ácidos, el efecto es más pronunciado, en hongos micorrízicos arbusculares y bacterias nitrificantes sensibles al pH, los cuales desempeñan un papel clave en la mineralización y el ciclo de nutrientes del ecosistema edáfico (Cáceres Lazo et al., 2022; Beyers et al., 2005; Calderón V. et al., 2019).

La diversidad microbiana (evaluada mediante índices como Shannon y Chao1) se ven significativamente reducidas tras incendios forestales, por la pérdida de especies clave que realizan funciones edáficas esenciales y un aumento temporal de microorganismos oportunistas, particulares termoresistentes como *Bacillus, Paenibacillus,* y algunas especies de *Actinobacterias*, conocidas por su capacidad esporulada y resistencia en condiciones extremas (Bhatt et al. 2025., Lucas-Borja et al., 2021). Mediante un análisis metagenómicos

reportaron un colapso en la estructura trófica de los suelos, inmediatamente posterior a la perturbación (fuego) implicando alteraciones en redes de interacción entre bacterias y hongos. La recuperación parcial de la diversidad se observó pasado 12 a 18 meses, en condiciones favorables con clima templado, buena cobertura vegetal, niveles adecuado de humedad y ausencia de perturbaciones posteriores.

En cuanto a la actividad enzimática del suelo, indicador clave del estado funcional microbiano, se observó una disminución significativa en enzimas como la deshidrogenasa, fosfatasa ácida y ureasa, reflejando una reducción general del metabolismo microbiano post incendio. Cáceres Lazo, (2022); reportaron una caída de hasta un 45% en la actividad deshidrogenasa y de un 38 % en la actividad ureasa en suelos de páramos andinos perturbados. Calderón Vásquez,(2019) complementa esta evidencia al demostrar una reducción del 40% en la respiración basal del suelo, medida a través de descenso en la disminución del consumo de oxígeno (O_2) y liberación de dióxido de carbono (CO_2) reforzando el diagnóstico de disfuncionalidad ecosistémica post incendio.

Además, varios estudios reportaron una alteración de la relación C:N del suelo, generalmente asociada a la pérdida de hasta un 35% de materia orgánica volátil como lo indican Cárdenas Ortiz et al. (2015), en suelos volcánicos y Cáceres Lazo et al. (2022) en suelos de páramo. Esta pérdida se traduce en un aumento de la relación C:N superando los valores críticos (>20:1), limitando inmediatamente la biodisponibilidad de nitrógeno para los microorganismos; sumada la inmovilización de nitrógeno en formas no asimilables, como compuestos orgánicos recalcitrantes y nitrógeno pirogénico (formas complejas generadas por el calor), que no están disponibles para la microbiota edáfica. Estas alteraciones interfieren en los ciclos biogeoquímicos y limitan la recolonización de comunidades microbianas especializadas, como, las degradadoras de residuos vegetales y compuestos orgánicos, las fijadoras de nitrógeno entre otras.

La tabla 6 derivada de la matriz propiedades biológicas del suelo (tabla 3). Presenta una síntesis significativa de estudios recientes que han abordado los parámetros afectados y que comprometen gravemente la capacidad de recuperación natural del ecosistema edáfico. Evidenciando la necesidad de implementar estrategias activas de restauración, como la biorremediación microbiana. La caracterización de estos efectos es crucial para seleccionar adecuadamente los bioindicadores y diseñar bioformulados específicos según el tipo de afectación detectada en el suelo post-incendio.

Tabla 6. Síntesis de los parámetros analizados.

Parámetro	Unidad de Medida	Importancia Ecológica	Cambio Post-Incendio	Método de Análisis
Biomasa microbiana	mg C/kg suelo	Actividad biológica, ciclado de nutrientes	Disminuye drásticamente	Fumigación-extracción
Diversidad microbiana	Índice Shannon/Chao1	Estructura trófica, estabilidad funcional	Disminución y cambio en composición	Secuenciación/metagenómica

Respiración basal	mg CO_2 m^{-2} h^{-1}	Tasa de metabolismo microbiano	Reducción del 37 al 74 %	Cámara de respiración, IRGA
Actividad enzimática	µmol p-NP/g/h	Indicadores funcionales (ureasa, fosfatasa, deshidrogenasa)	Reducción fuerte	Colorimetría, espectrofotometría
pH del suelo	UND	Biodisponibilidad de nutrientes, composición de comunidades	Aumento por cenizas	Potenciómetro
Relación C:N	Proporción	Equilibrio entre fuentes de energía y nutrientes	Disminuye o se desequilibra	Análisis elemental (C/N)

4.2 Especies microbianas con potencial biorremediador y restaurador

En cuanto a la identificación de especies microbianas con capacidad restauradora, la revisión destaca particularmente a géneros como *Pseudomonas, Bacillus, Trichoderma y micorrizas arbusculares* (AMF) como los principales agentes con potencial biorremediador (Muñoz-Rojas et al., 2021; Fuentes-Ramírez et al., 2018). Estas especies muestran propiedades multifuncionales, incluyendo la producción de enzimas degradadoras de compuestos tóxicos tales como catalas, peroxidasas y lacasas que oxidan residuos orgánicos, lignina y derivados aromáticos persistentes, favoreciendo la descomposición en compuestos más asimilables. A su vez intervienen en la fijación biológica de nitrógeno, estabilización del ecosistema edáfico y la promoción del crecimiento vegetal a través de la síntesis de fitohormonas auxinas y giberelinas. No obstante, su efectividad depende de factores ambientales como la temperatura, pH, contenido de humedad del suelo, y la disponibilidad de nutrientes, influyendo en la supervivencia y la actividad del inoculante. También la afinidad con la microbiota nativa es un factor crítico, ya que puede darse un efecto antagónico por el nicho ecológico y al introducir cepas exógenas, ejercer una competitividad o la falta de simbiosis funcional; lo que justifica el estudio de estrategias de inoculación adaptadas al contexto climático y edáfico local (Čaušević et al., 2024; Papin et al., 2024).

Los bioformulados microbianos emergen como una herramienta prometedora para acelerar la restauración de suelos post-incendios, ofreciendo una alternativa sostenible frente a métodos convencionales como la fertilización química o la rehabilitación física. La revisión evidencia que los bioformulados están generalmente compuestos por consorcios microbianos que contienen bacterias promotoras del crecimiento vegetal como *Pseudomonas* y *Bacillus*, y hongos micorrícicos arbusculares; que en conjunto pueden mejorar significativamente la estructura del suelo, la actividad enzimática, degradación de compuestos tóxicos, disponibilidad de nutrientes y la regeneración de cobertura vegetal; favoreciendo la recuperación de funciones ecosistémicas críticas, como la retención de humedad, el ciclado de nutrientes y la estabilización de carbono orgánico (Andreolli et al., 2021; Antoninka et al., 2020). Sin embargo, estudios como Acea et al. (2005) indican que la efectividad de estos bioformulados es variable y depende de factores como la formulación específica del

inoculante, la dosis suministrada, el método de aplicación, el momento de la inoculación y la compatibilidad con la microbiota nativa. Además la estructura de suelo influye en la viabilidad de bioformulado ya que determina el acceso de inóculo, la retención de humedad y la estabilidad de los agregados; condiciones claves para el establecimiento, resiliencia y persistencia de los microorganismos.

La tabla 7 resume los hallazgos más relevantes de la literatura revisada sobre las especies y géneros microbianos con potencial restaurador en ecosistemas edáficos post-incendio. Se destacan géneros como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Trichoderma*, cianobacterias (*Nostoc*) y hongos micorrízicos, cuya funcionalidad ecológica abarca desde la fijación de nitrógeno y la degradación de compuestos tóxicos como hidrocarburos policíclicos (HAPs), hasta la producción de enzimas y metabolitos que estimulan el crecimiento vegetal y reactivación de los ciclos biogeoquímicos. La evidencia experimental, proviene tanto de estudios en laboratorio como de ensayos en campo, permite identificar su aplicabilidad en distintos contextos edáficos y climáticos.

Tabla 7. Matriz determinación del potencial de biorremediación que tienen los microorganismos para restaurar los suelos afectados por incendios.

Estudio	Microorganismo(s)	Tipo (Bacteria / Hongo / Actinomiceto)	Mecanismo de acción en la biorremediación	Contaminantes degradados y/o Nutrientes fijados	Evidencia en la restauración de suelos
Andreolli et al. (2015)	*Pseudomonas* + consorcio nativo *(fluorescens, Rhodococcus erythropolis, Bacillus licheniformis)*	Bacterias	Degradación de compuestos tóxicos y mejoraron la actividad microbiana autóctona.	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y metales pesados. Fijación de N	Restauración de la calidad biológica y química del suelo, reduciendo la toxicidad y permitiendo su recuperación ecológica y funcional.
Acea et al. (2005)	*Nostoc muscorum, Anabaena cylindrica*	Cianobacterias	Fijan nitrógeno atmosférico y activan la biomasa microbiana del suelo	Fijación de nitrógeno ($N_2 \rightarrow NH_4^+$), incremento de carbono microbiano, reactivación de ciclos biogeoquímicos.	Restablecimiento de comunidades microbianas. Contribuyen a la mejora de la fertilidad, la estabilidad estructural y la regeneración de la productividad edáfica.
Andreolli et al. (2015, 2021)	*Trichoderma sp.* y otras cepas microbianas nativas	Hongos	Bioestimulación y bioaumento para degradación de contaminantes hidrocarburados post incendio	Degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y metales pesados. Fijación de N	Restauración y estabilización de la calidad biológica y química del suelo, reduciendo la toxicidad y permitiendo su recuperación ecológica y funcional.
Pizarro-Tobías et al. (2015)	*Pseudomonas putida* + consorcio micorrízico	Bacterias y hongos	Bioaumentación con cepas de P. putida y consorcios	Degradación de hidrocarburos aromáticos monoaromáticos y policíclicos (PAHs)	Restauración de las condiciones del suelo momentos previos al incendio, destacando la

	(Hongos y bacterias)		microbianos nativos.		eficacia de la rizorremediación

Los resultados obtenidos, sobre la evidencia experimental se determinaron mediante mediciones de reducción en la concentración de contaminantes (por cromatografía y espectrofotometría de masas), incremento de la biomasa microbiana (por fumigación clorofórmica y conteo en placa), y mejoras en parámetros funcionales del suelo como la respiración basal, actividad enzimática (deshidrogenasa, ureasa, fosfatasa), y la estabilidad de agregados. Para algunos casos como el estudio de Andreolli et al. (2015), reportaron una reducción del 60% de HAPs liberados en suelos posterior a incendió, tras 60 días de tratamiento mientras que Acea et al. (2005), reportaron incrementos del 45% en carbono microbiano y mejoras en la fijación de nitrógeno por cianobacterias como *Nostoc muscorum*. vegetal.

Dentro de las bacterias y cianobacterias identificadas, los géneros *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azospirillum* y *Nostoc* se destacan por su frecuente aparición en los estudios y por la diversidad funcional ecológica que desempeñan. Estos microorganismos no solo contribuyen a la solubilización de nutrientes esenciales como el nitrógeno y el fósforo a través de procesos como la fijacion biologica de nitrogeno (N_2) atmosférico, (*Rhizobium*, *Azospirillum*) o la produccion de acidos organicos movilizadores de fosforo (*Bacillus*); sino que también participan en procesos de detoxificación de contaminantes orgánicos e inorgánicos. En particular especies como *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus licheniformis* degradan hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), mediante la producción de enzimas como monooxigenasas y dioxigenasas, que catalizan la ruptura de los anillos aromáticos, transformándolos en compuestos menos tóxicos y más asimilables (Andreolli et al., 2015; 2021). Además se observó que algunas cepas tienen capacidad de biosorción y bioacumulación de metales pesados, permitiendo inmovilizarlos en formas menos biodisponibles, para a su vez permitir la recuperación de la calidad química del suelo post incendio.

La presencia incidente de *Pseudomonas spp.* y *Bacillus spp.* en contextos de suelos quemados se relaciona con su alta capacidad de adaptación a condiciones ambientales adversas y su potencial de colonización rápida. Estos géneros han sido ampliamente utilizados en bioformulados agrícolas por sus propiedades de estimulación vegetal, producción de sideróforos, antibiosis y mejora la tolerancia al estrés abiótico (Carvajal, M. & Cereceda, F. 2024., Bio-Ilíberis., 2012). Su aplicación en escenarios post-incendio representa una estrategia prometedora para acelerar la reactivación de la actividad microbiana del suelo y favorecer la revegetación.

En el caso de los hongos, los estudios revisados reportan ampliamente la eficacia de asociaciones micorrízicas en la recuperación de suelos degradados. Las *micorrizas arbusculares* y ectomicorrizas promueven la absorción de nutrientes, estabilizan la estructura del suelo mediante redes hifales, y actúan como biofiltros que protegen las raíces de contaminantes presentes en suelos afectados por incendios (Chamizo et al., 2020). La simbiosis micorrízica no solo mejora la supervivencia de especies vegetales nativas, sino que también contribuye a la restauración del microhábitat y de las redes tróficas edáficas.

La figura 1, fue elaborada a partir de los datos recopilados de la tabla 7. Matriz de determinación del potencial de biorremediación que tienen los microorganismos para restaurar los suelos afectados por incendios. Para su construcción, se trasladaron todos los datos registrados en la matriz a una hoja de cálculo en Excel. A partir de esta base, se identificaron y cuantificaron los tipos de microorganismos analizados en cada estudio. Posteriormente, se realizó la categorización por tipo microbiano (bacterias, hongos, cianobacterias y actinomicetos), lo cual permitió representar gráficamente tanto la frecuencia relativa de los géneros más recurrentes como la distribución general por categoría microbiana.

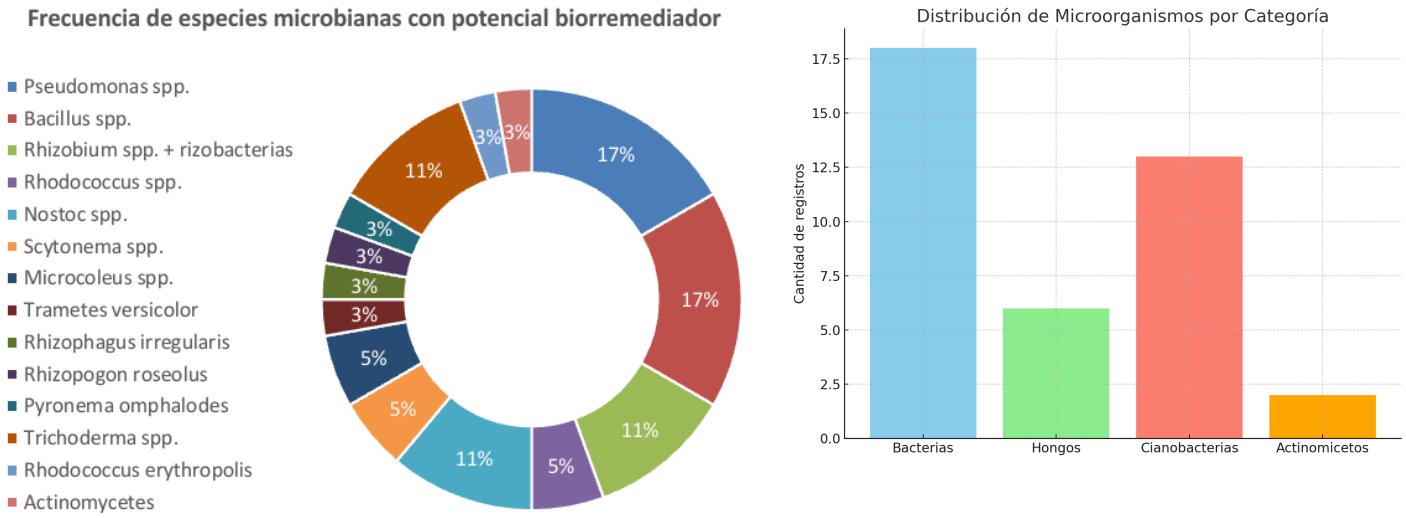


Figura 1. Frecuencia y distribución de especies microbianas con potencial biorremediador identificadas en la revisión sistemática.

La gráfica circular representa la frecuencia relativa de los géneros microbianos más recurrentes en los estudios seleccionados, con mayor presencia de *Pseudomonas spp.*, *Bacillus spp. Rhizobium spp.* en combinación con rizobacterias. Estos géneros fueron citados en un 17 % de los estudios respectivamente, seguido de *Nostoc* (cianobacteria) con un 11 %; nombrados por su versatilidad funcional en procesos como la fijación de nitrógeno, degradación de hidrocarburos y promoción del crecimiento vegetal. La gráfica de barras, por su parte, muestra la distribución total de los microorganismos categorizados por tipo: bacterias, hongos, cianobacterias y actinomicetos. Las bacterias representaron el grupo más numeroso (47 %), seguidas de las cianobacterias (34 %), lo que indica una alta prevalencia de estos grupos en

contextos de restauración de suelos post-incendios. Estos resultados refuerzan la importancia de estrategias microbianas integradas para lograr la recuperación funcional del suelo.

Es importante destacar que algunos de los estudios identificados coinciden que los restauradores más efectivos se logran mediante el uso consorcios microbianos, es decir, combinaciones de bacterias, hongos y/o cianobacterias seleccionados de manera específica, que actúan de manera sinérgica por su complejidad funcional. Por ejemplo, Andrade et al. (2017), evidenciaron que consorcios derivados de suelos nativos, compuestos por bacterias y hongos asociados, lograron un incremento del 25% en el carbono activo y un 18% en el nitrógeno total en suelos simulados por incendios. Estos efectos fueron más marcados en suelos de textura franca (arenoso), con mayor capacidad de retención de la humedad. De igual manera Carvajal y Cereceda (2024), reportaron que el uso de formulaciones combinadas de cepas bacterianas y hongos micorrízicos nativos no solo beneficia y mejora la recuperacion quimica del suelo; sino también optimiza la reactivación de comunidades microbianas funcionales en escenarios de campo, como suelos volcánicos del centro de Chile. Asuvez este enfoque multiespecífico permite degradar compuestos tóxicos complejos como fenoles y HAPs, al combinar rutas metabólicas complementarias, favoreciendo la resistencia microbiana frente a condiciones ambientales variables. En este sentido, los consorcios han demostrado un mejor rendimiento en suelos heterogéneos o con disturbios sucesivos, apoyando una perspectiva de restauración ecológica y funcional que busca restablecer la integridad biológica del suelo afectado.

Sin embargo, también se identificaron vacíos relevantes en cuanto a la estandarización metodológica de los ensayos y limitaciones en la extrapolación de resultados obtenidos en laboratorio al contexto real de campo. Por ejemplo en el proyecto Bio-Ilíberis (BACSIN, 2012), aunque se comprobó la efectividad del consorcio Byodri para degradar PAHs y mejorar la calidad del suelo, no se cuantificó la viabilidad (persistencia) microbiana a largo plazo, ni la interacción con la microbiota nativa en condiciones naturales. De manera similar Chamizo et al. (UAL-Florencia, 2012–2018), evidenciaron en mesocosmo la capacidad de *Nostoc commune* y *Scytonema javanicum* para formar biocostras y mejorar la estabilidad superficial del suelos en 15 días, pero reconocen que los resultados no garantizan la misma efectividad en suelos áridos bajo estrés hídrico con perturbaciones mecánicas.

Otro punto crítico emerge en la falta de estandarización y regulación de la producción y aplicación de bioformulados microbianos para suelos afectados por incendios, Chamizo et al. (2020) destaca que aunque los ensayos con cianobacterias han mostrado resultados prometedores; su aplicación a gran escala carece de protocolos definidos y replicables. Claridge et al. (2009) también señala que los estudios en condiciones controladas rara vez, consideran las variaciones climáticas, la interacción con el ecosistema edáfico nativo, el historial de perturbaciones, lo que limita la exploración de los resultados. Por otra parte, Niza Costa et al. (2023) enfatiza en que, uno de los principales desafíos en la restauración microbiana es la efectividad en el desempeño del inoculante, incluyendo el tipo el tipo de

suelo, el grado de intensidad del fuego (perturbación) y el momento de aplicación lo que afecta la viabilidad del escalamiento.

Mientras que algunos trabajos reportan resultados exitosos en condiciones de laboratorio y parcelas experimentales controladas (Kim et al., 2022), existe una brecha significativa en la validación y escalamiento a nivel campo en ecosistemas naturales. Esta brecha resalta la necesidad de estudios a largo plazo que evalúen no solo la recuperación inmediata sino la sostenibilidad de las comunidades microbianas introducidas y su impacto en la restauración del ecosistema edáfico a gran escala. La falta de estandarización metodológica y de estudios a largo plazo, dificultan la evaluación de sostenibilidad en las comunidades microbianas introducidas y su efectividad funcional en los ecosistemas edáficos; enmarcando la necesidad de validación bajo condiciones de campo con seguimiento continuo y a largo plazo.

Además, se observa una tendencia creciente en la investigación hacia la combinación de técnicas moleculares avanzadas, como metagenómica y transcriptómica, para comprender mejor las dinámicas funcionales de las comunidades microbianas post-incendio y optimizar la selección de cepas con mayor capacidad biorremediadora (García et al., 2023). Esta integración tecnológica representa un avance sustancial frente a los métodos tradicionales basados únicamente en cultivos y pruebas fenotípicas.

La tabla 8 sintetiza diversas investigaciones que evalúan el uso de bioformulados microbianos en procesos de restauración ecológica, especialmente en suelos degradados por incendios o actividades mineras. Se presenta información clave sobre el tipo de bioformulado, su composición, la forma de aplicación, el entorno experimental y los principales resultados obtenidos. Además, se señalan algunas limitaciones que enfrentan estas estrategias, como la variabilidad en la eficacia según el sitio o la baja persistencia de los microorganismos en el suelo.

Tabla 8. Matriz análisis de las características y aplicaciones de bioformulados microbianos en restauración de suelos incendiados.

Estudio	Tipo de bioformulado	Composición microbiana	Método de aplicación	Contexto de uso	Resultados reportados	Limitaciones o desafíos
García-Carmona et al., (2023)	Biofertilizante sólido	Comunidades bacterianas y fúngicas adaptadas al biocrust.	Aplicación directa al suelo	Suelos mediterraneo	Aceleración recuperación microbiana y estabilización del suelo.	Biocrust sensible a alteraciones físicas y climáticas.

El Fantroussi & Agathos (2005) / Mrozik & Piotrowska-Seget (2010)	Bioaumentación	Consorcios bacterianos especializados	Aplicación controlada en sistemas confinados	Restauración biorremediación	Mejora la degradación de contaminantes, optimiza recuperación de suelos contaminados	Competencia microbiana y variabilidad ambiental dificultan efectividad en campo
Muñoz et al., (2016)	Aislados microbianos	*B. mycoides*, *B. megaterium*, *Burkholderia*	Inoculación de cepas seleccionadas	Campo (Cali, Yumbo, Jamundí)	Solubilización de fósforo, fijación de N_2, crecimiento bajo condiciones locales	Fase exploratoria, no hay formulación comercial
Andrade et al. (2017)	Extracto microbiano nativo	Comunidades diversas (PCR-DGGE)	Inóculo líquido aplicado al suelo	Macetas en laboratorio. PCR-DGGE para análisis de comunidades microbianas	Incremento en N total y carbono activo	Condiciones simuladas; falta validación en campo
Carvajal & Cereceda (2024)	Bioformulado líquido sintético	Bacterias y hongos nativos	Inoculación en suelos siniestrados	Campo y laboratorio	Diseño funcional orientado a condiciones reales; mejora preliminar de parámetros de fertilidad edáfica	En etapa de diseño; no aplicado a gran escala
Chamizo et al., (2018)	Inóculo de cianobacterias	*Nostoc commune*, *Scytonema*, *Microcoleus*	Aplicación en suelos quemados simulados	Laboratorio (mesocosmos)	Formación de biocostra en 15 días; aumento de estabilidad superficial	Ensayo corto y en laboratorio; requiere verificación a largo plazo

Bio-Ilíberis (Proyecto BACSIN, 2012)	Consorcio bacteriano (Biodry)	*Pseudomonas putida*, *Rhodococcus*, otros	Aplicación en campo post-incendio	Campo (España). Formación de biocostra evaluada en 15 días	Degradación de contaminantes post-fuego (PAHs, hidrocarburos)	Baja cuantificación microbiológica reportada

La síntesis de los 6 estudios revisados revela un avance significativo en el diseño y aplicación de bioformulados microbianos para la restauración de suelos afectados por incendios forestales. Estas formulaciones, basadas en bacterias, hongos y cianobacterias, han sido desarrolladas para acelerar procesos como la recuperación estructural del suelo, la mejora en la disponibilidad de nutrientes y la estimulación del crecimiento vegetal. Por ejemplo, Chamizo et al. (2018), evaluaron la recuperación estructural mediante ensayos de estabilidad de agregados, reportando un aumento en la estabilidad superficial tras la formación de biocostra en 15 días. En un estudio independiente, Andrade et al. (2017) determinaron la biodisponibilidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo), mediante análisis químicos estándar de nitrógeno total y carbono activo. Asimismo, Carvajal & Cereceda (2024), midieron la estimulación del crecimiento vegetal a través de ensayos de biomasa aérea y radicular observando mejoras preliminares en la fertilidad edáfica en suelos perturbados. Por otra parte, García-Carmona et al. (2023) realizaron análisis de biomasa microbiana y cobertura de biocrust para evaluar la estabilización y recuperación microbiana en suelos mediterráneos.

Como, González et al. (2021) evaluaron un biofertilizante sólido compuesto por *Bacillus* y *Pseudomonas*, aplicado directamente al suelo en condiciones de invernadero, logrando una mejora notable en el crecimiento vegetal y la estructura edáfica. Sin embargo, este tipo de intervención aún enfrenta desafíos en cuanto al escalamiento a campo, donde la variabilidad ambiental puede reducir su eficacia.

En el ámbito de la bioaumentación, El Fantroussi & Agathos (2005) y Mrozik & Piotrowska-Seget (2010) describieron el uso de consorcios bacterianos especializados, aplicados en sistemas confinados para biorremediación, demostrando su eficacia en la degradación de contaminantes y la recuperación de suelos alterados. No obstante, las condiciones ambientales variables y el antagonismo microbiana en campo atribuyen dificultad para la efectividad de estas estrategias en escenarios naturales.

En Colombia, Muñoz et al. (2016) realizaron inoculaciones de cepas aisladas como *Bacillus mycoides*, *B. megaterium* y *Burkholderia* en suelos quemados de zonas rurales de Cali, Yumbo y Jamundí, obteniendo resultados prometedores en la solubilización de fósforo y la fijación biológica de nitrógeno. Aunque los efectos positivos fueron evidentes, el estudio se encuentra aún en una fase experimental, sin haber alcanzado un nivel de formulación estándar. De manera complementaria, Andrade et al. (2017) aplicaron un extracto microbiano nativo sobre suelos simulados en macetas, observando un aumento en nitrógeno total y carbono activo. Sin embargo, dado que los ensayos se realizaron bajo condiciones controladas, se requiere validación en escenarios reales de campo para confirmar su aplicabilidad y eficacia.

En estudios más avanzados de desarrollo, Carvajal y Cereceda (2024) diseñaron un bioformulado líquido con bacterias y hongos nativos, aplicado en suelos perturbados bajo condiciones de laboratorio y campo. Este trabajo evidenció mejoras preliminares en parámetros de fertilidad edáfica, aunque aún se encuentra en fase piloto, sin implementación a gran escala.

Las biocostras microbianas también se consolidan como una estrategia eficaz en entornos áridos o erosionados. Chamizo et al. (2018), mediante la aplicación de un inóculo de cianobacterias (*Nostoc commune*, *Scytonema*, *Microcoleus*) en mesocosmos de laboratorio, lograron la formación de biocostras estables en solo 15 días, mejorando la estabilidad superficial del suelo. Si bien los resultados son alentadores, el lapso del ensayo y el ambiente controlado limitan aún su exploración en campo.

En una escala operativa más amplia, el proyecto Bio-Ilíberis (BACSIN, 2012) aplicó un consorcio bacteriano degradador comercial conocido como "Biodry", con especies como *Pseudomonas putida* y *Rhodococcus*, en suelos quemados en España. Se reportó una degradación efectiva de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y otros contaminantes, aunque la falta de cuantificación detallada del desempeño microbiano limita la robustez de sus resultados.

Estos hallazgos refuerzan la importancia de adaptar cada formulación al tipo de suelo, al grado de perturbación y al contexto ecológico específico. Además, evidencian que la restauración edáfica post-incendios no depende únicamente de la inoculación microbiana, sino de una combinación estratégica de enfoques biológicos, físicos, químicos y ecológicos. El éxito a largo plazo de estas estrategias requiere la validación de su efectividad en campo, el monitoreo continuo de los indicadores de calidad del suelo y la participación local para su implementación.

5. CONCLUSIONES

Los incendios forestales generan alteraciones desfavorables significativas, en las propiedades biológicas del suelo, reduciendo la biomasa y diversidad microbiana, la respiración basal y la actividad enzimática; estos efectos comprometen los ciclos biogeoquímicos esenciales y dificultan la regeneración natural del ecosistema edáfico.

Los géneros microbianos con potencial restaurador, como Pseudomonas, Bacillus, Trichoderma y Nostoc, fueron los más nombrados y destacados en los estudios seleccionados por sus capacidades para fijar nitrógeno, degradar compuestos tóxicos y promover el crecimiento vegetal; aunque su efectividad se ve limitada por la compatibilidad con la microbiota nativa y las condiciones edáficas.

Los bioformulados microbianos analizados, compuestos generalmente por consorcios (bacterias, hongos y/o cianobacterias), demostraron optimizar los procesos de restauración en ambientes controlados; sin embargo, su aplicación en campo aún requiere más estudios que aporten a su validación, estandarización metodológica y adaptaciones contextuales.

Para concluir, el uso de microorganismos en la biorremediación de suelos perturbados por el fuego, representa una alternativa sostenible con un alto potencial funcional; no obstante, su efectividad aún depende de múltiples factores ambientales, por lo que se requieren estudios con un enfoque integral y contextualizado para garantizar un uso efectivo y ecológico a largo plazo.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios porque él fue mi ratificación día con día durante este proceso formativo y en mi vida. También agradezco profundamente al profesor Fabián Felipe Fernández Daza, tutor de este trabajo de grado, por su guía, compromiso y acompañamiento durante todo el proceso investigativo. A la Universidad, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente en un entorno académico que siempre promovió la excelencia. Y a mi familia, por su apoyo incondicional, motivación constante y confianza en cada etapa de mi formación.

7. DECLARACIÓN DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la redacción ni creación de este artículo, solo como apoyo para la gestión de información.

8. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acea, M. J., Prieto-Fernández, A., & Diz-Cid, N. (2005). Cyanobacterial inoculation of heated soils: effect on microorganisms of C and N cycles and on chemical composition in soil surface. Soil Biology and Biochemistry, 35(4), 513-524 https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00005-1
2. Adams, G. O., Fufeyin, P. T., Okoro, S. E., & Ehinomen, I. (2015). Bioremediation, biostimulation and bioaugmention: a review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, *3*(1), 28-39. DOI:10.12691/ijebb-3-1-5
3. Agbeshie, AA, Abugre, S., Atta-Darkwa, T. y Awuah, R. (2022). Una revisión de los efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Journal of Forestry Research , 33 (5), 1419-1441 https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4
4. Álvarez Andino, K. F., & Ramos Pilataxi, H. W. (2024). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de los suelos y mesofauna afectados por los incendios en el ecosistema herbazal del páramo Navag, cantón Colta http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/22174
5. Andrade, S. X. M., Mejía, J. A. P., & Guerrero, P. A. C. (2017). Mejoramiento de suelos afectados por incendios forestales usando microbiota de suelos nativos. *AXIOMA*, (17), 14-27.
6. Andreolli, M., Lampis, S., Brignoli, P., & Vallini, G. (2015). Bioaugmentation and biostimulation as strategies for the bioremediation of a burned woodland soil contaminated by toxic hydrocarbons: a comparative study. Journal of environmental management, 153, 121-131. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.007

7. Andreolli, M., Lampis, S., Brignoli, P., & Vallini, G. (2021). Mesocosm-based simulations to optimize a bioremediation strategy for the effective restoration of wildfire-impacted soils contaminated with high-molecular-weight hydrocarbons. Journal of Applied Microbiology, 131(3), 1249-1260 https://doi.org/10.1111/jam.15018
8. Andreolli, M., Lampis, S., Brignoli, P., & Vallini, G (2015). Microbial cenoses and comparison of different bioremediation protocols in a wildfire--impacted forest soil.
9. Antoninka, A., Faist, A., Rodriguez-Caballero, E., Young, K. E., Chaudhary, V. B., Condon, L. A., & Pyke, D. A. (2020). Biological soil crusts in ecological restoration: emerging research and perspectives. Restoration Ecology, 28, S3-S8 https://doi.org/10.1111/rec.13201
10. Armenteras, D., González, T. M., Vargas Ríos, O., Meza Elizalde, M. C., & Oliveras, I. (2020). Incendios en ecosistemas del norte de Suramérica: avances en la ecología del fuego tropical en Colombia, Ecuador y Perú. Caldasia, 42(1), 1-16 https://doi.org/10.15446/caldasia.v42n1.77353
11. Ayuso, S. V., Giraldo-Silva, A., Barger, N. N., & Garcia-Pichel, F. (2020). Microbial inoculum production for biocrust restoration: testing the effects of a common substrate versus native soils on yield and community composition. Restoration Ecology, 28, S194-S202 https://doi.org/10.1111/rec.13127
12. Barreiro, A., & Díaz-Raviña, M. (2021). Fire impacts on soil microorganisms: Mass, activity, and diversity. Current Opinion in Environmental Science & Health, 22, 100264 https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100264
13. Barros, A. M., Ager, A. A., Day, M. A., Krawchuk, M. A., & Spies, T. A. (2018). Wildfires managed for restoration enhance ecological resilience. Ecosphere, 9(3), e02161 https://doi.org/10.1002/ecs2.2161
14. Belongia, M. F., Hammond Wagner, C., Seipp, K. Q., & Ajami, N. K. (2023). Building water resilience in the face of cascading wildfire risks. Science Advances, 9(37), eadf9534 DOI: 10.1126/sciadv.adf9534
15. Bento, F. M., Camargo, F. A., Okeke, B. C., & Frankenberger, W. T. (2005). Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. Bioresource technology, 96(9), 1049-1055 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.09.008
16. Beyers, J. L., Neary, D. G., Ryan, K. C., & DeBano, L. F. (2005). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soil and water. United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
17. Beyschlag, W., Wittland, M., Jentsch, A., & Steinlein, T. (2008). Soil crusts and disturbance benefit plant germination, establishment and growth on nutrient deficient sand. Basic and applied ecology, 9(3), 243-252 https://doi.org/10.1016/j.baae.2007.03.002
18. Bhatt, S., Chouhan, U., & Choudhari, J. K. (2025). Metagenome Analysis of Forest Fire Soil to Understand the Impact of Fire on the Diversity of Microorganisms. Geomicrobiology Journal, 1-18 https://doi.org/10.1080/01490451.2025.2460516
19. Billings, ML (2014). *Estudio microscópico de la atenuación natural, bioestimulación y bioaumentación de suelos contaminados con PCB, dioxinas, HAP e hidrocarburos de petróleo* . Universidad Politécnica Estatal de California.
20. Bio-Ilíberis (Proy. BACSIN). (2012). *Un nuevo producto con bacterias ayuda a la recuperación del suelo quemado*. *Comunidad ISM*.
21. Bogorodskaya, AV, Krasnoshchekova, EN, Bezkorovainaya, IN, & Ivanova, GA (2010). Transformación post-incendio de comunidades microbianas y complejos de invertebrados en suelos de bosques de pinos, Siberia central. Problemas contemporáneos de ecología , 3 , 653-659

https://doi.org/10.1134/S199542551006007X
22. Bollag, JM, Frankenberger, WT y Sims, RC (1999). Biorremediación de suelos contaminados (Vol. 37). DC Adriano (Ed.). Wisconsin: Sociedad Americana de Agronomía
23. Bohórquez Romero, C. E., & Gómez Carvajal, M. I. (2023). Evaluación de especies vegetales para la recuperación de suelos afectados por incendios forestales en el bosque seco tropical en el municipio de Girardot-Cundinamarca.
24. Bornmann, L., & Daniel, H. D. (2007). What do we know about the h-index? Journal of the American Society for Information Science and Technology, 58(9), 1381–1385 https://doi.org/10.1002/asi.20609
25. Bouskill, N. J., Mekonnen, Z., Zhu, Q., Grant, R., & Riley, W. J. (2022). Microbial contribution to post-fire tundra ecosystem recovery over the 21st century. Communications Earth & Environment, 3(1), 26 https://doi.org/10.1038/s43247-022-00356-2
26. Brianne, P., Rebecca, H., & David, L. (2020). The fate of biological soil crusts after fire: a meta-analysis. Global Ecology and Conservation, 24, e01380 https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01380
27. Büdel, B., Dulić, T., Darienko, T., Rybalka, N., & Friedl, T. (2016). Cyanobacteria and algae of biological soil crusts. Biological soil crusts: an organizing principle in drylands, 55-80 https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_4
28. Buytaert, W., Iniguez, V., & De Bievre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. Forest ecology and management, 251(1-2), 22-30 https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035
29. Cáceres Lazo, J. C. (2022). Evaluación de los efectos de un incendio en las propiedades hidrofísico-químicas del suelo y biomasa vegetal en una zona de páramo en el área de amortiguamiento del Parque Nacional Cajas. http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/40355
30. Calderón Vásquez, W. R. (2019). Evaluación del impacto ambiental sobre la biodiversidad del suelo causado por un incendio forestal en la provincia de jaén, 2019. https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/149
31. Cantón, Y., Chamizo, S., Rodriguez-Caballero, E., Lázaro, R., Roncero-Ramos, B., Román, J. R., & Solé-Benet, A. (2020). Water regulation in cyanobacterial biocrusts from drylands: negative impacts of anthropogenic disturbance. Water, 12(3), 720https://doi.org/10.3390/w12030720
32. Cárdenas Ortiz, D. A., & Zapata Flores, E. M. (2015). Determinación experimental de los cambios en las propiedades físico químicas en dos diferentes tipos de suelos expuestos a distintas temperaturas simulando incendios forestales (Bachelor's thesis) https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10083
33. Carrera Andrango, L. F. (2017). Efecto del calentamiento del suelo en la capacidad de sorción de las sustancias húmicas sobre metales y cambios en la repelencia al agua simulando incendios de baja, mediana y alta intensidad en la Reserva Ecológica del Antisana (Bachelor's thesis) https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13734
34. Carvajal, M., & Cereceda, F. (2024). *Técnicas de reactivación microbiana permitirían restaurar suelos siniestrados por incendios forestales (Proyecto BioBennu)*. *Universidad Técnica Federico Santa María*.
35. Čaušević, A., Zühlke, D., Schönherr, J., Meyer, H., Viehweger, A., Verwaaijen, B., Schneiker-Bekel, S., & Seifert, J. (2024). Bacterial inoculants show no persistence in soil and may facilitate growth of indigenous microbiota. Environmental Microbiome, 19(1), 10. https://doi.org/10.1186/s40793-024-00561-x

36. Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: A review. Oecologia, 143(1), 1-10. https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-5
37. Chamizo, S., Adessi, A., Certini, G., & De Philippis, R. (2020). Cyanobacteria inoculation as a potential tool for stabilization of burned soils. Restoration Ecology, 28, S106-S114 https://doi.org/10.1111/rec.13092
38. Chamizo, S., Mugnai, G., Rossi, F., Certini, G., & De Philippis, R. (2018). Cyanobacteria inoculation improves soil stability and fertility on different textured soils: gaining insights for applicability in soil restoration. Frontiers in Environmental Science, 6, 49 https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00049
39. Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Román, J. R., & Cantón, Y. (2017). Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall. Catena, 148, 117-125https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.017
40. Chaudhary, V. B., Akland, K., Johnson, N. C., & Bowker, M. A. (2020). Do soil inoculants accelerate dryland restoration? A simultaneous assessment of biocrusts and mycorrhizal fungi. Restoration Ecology, 28, S115-S126https://doi.org/10.1111/rec.13088
41. Chodak, M., Sroka, K., Woś, B., & Pietrzykowski, M. (2022). Chemical and microbial properties of post-mining and post-fire soils afforested with different tree species. Applied Soil Ecology, 171, 104321 https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104321
42. Claridge, A. W., Trappe, J. M., & Hansen, K. (2009). Do fungi have a role as soil stabilizers and remediators after forest fire?. Forest ecology and management, 257(3), 1063-1069 https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.11.011
43. Coleine, C., Delgado-Baquerizo, M., DiRuggiero, J., Guirado, E., Harfouche, A. L., Perez-Fernandez, C., ... & Egidi, E. (2024). Dryland microbiomes reveal community adaptations to desertification and climate change. The ISME Journal, 18(1), wrae056 https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae056
44. Colombo, J. C., Cabello, M., & Arambarri, A. M. (1996). Biodegradation of aliphatic and aromatic hydrocarbons by natural soil microflora and pure cultures of imperfect and lignolitic fungi. Environmental pollution, 94(3), 355-362. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(96)00044-9
45. COPE. (2023). Principles of Transparency and Best Practice in Scholarly Publishing (4ª ed.). Committee on Publication Ethics https://publicationethics.org/resources/guidelines
46. Cusma Vargas, A. I., & Chasquero Samaniego, J. E. (2025). Biorremediación de un suelo impactado por rozo y quema agrícola en el distrito Bellavista Región Cajamarca https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/824
47. Cutler, N. A., Arróniz-Crespo, M., Street, L. E., Jones, D. L., Chaput, D. L., & DeLuca, T. H. (2017). Long-term recovery of microbial communities in the boreal bryosphere following fire disturbance. Microbial ecology, 73, 75-90 https://doi.org/10.1007/s00248-016-0832-7
48. Díaz-Raviña, M., Lombao Vázquez, A., Barreiro Buján, A. I., Martín Jiménez, A., & Carballas Fernández, T. (2018). Medium-term impact of post-fire emergency rehabilitation techniques on a shrubland ecosystem in Galicia (NW Spain). Spanish Journal of Soil Science.
49. Dindaroğlu, T., & Turan, F. (2019). Investigation of natural resilience capacity of soil features affected by low severity ground wildfire after three years in Mediterranean forest ecosystem. Eurasian Journal of Forest Science, 7(2), 145-156 https://doi.org/10.31195/ejejfs.568734
50. Doherty, K. D., Grover, H. S., Bowker, M. A., Durham, R. A., Antoninka, A. J., & Ramsey, P. W. (2020). Producing moss-colonized burlap fabric in a fog chamber for restoration of biocrust. Ecological Engineering, 158, 106019

https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106019
51. Dooley, S. R., & Treseder, K. K. (2012). The effect of fire on microbial biomass: a meta-analysis of field studies. Biogeochemistry, 109, 49-61 https://doi.org/10.1007/s10533-011-9633-8
52. El Fantroussi, S., & Agathos, S. N. (2005). Is bioaugmentation a feasible strategy for pollutant removal and site remediation?. Current opinion in microbiology, 8(3), 268-275 https://doi.org/10.1016/j.mib.2005.04.011
53. El Fantroussi, S., & Agathos, S. N. (2005). Is bioaugmentation a feasible strategy for pollutant removal and site remediation?. Current opinion in microbiology, 8(3), 268-275.https://doi.org/10.1016/j.mib.2005.04.011
54. Elakiya, N., Keerthana, G., & Safiya, S. (2023). Effects of Forest Fire on Soil Properties. International Journal of Plant & Soil Science, 35(20), 8-17 https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i203780
55. Fernández-García, V., Miesel, J., Baeza, M. J., Marcos, E., & Calvo, L. (2019). Wildfire effects on soil properties in fire-prone pine ecosystems: Indicators of burn severity legacy over the medium term after fire. Applied Soil Ecology, 135, 147-156 https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.12.002
56. Fontúrbel, M. T., Barreiro, A., Vega, J. A., Martín, A., Jiménez, E., Carballas, T., ... & Díaz-Raviña, M. (2012). Effects of an experimental fire and post-fire stabilization treatments on soil microbial communities. Geoderma, 191, 51-60 https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.037
57. Forján, R., Lores, I., Sierra, C., Baragaño, D., Gallego, J. L. R., & Peláez, A. I. (2020). Bioaugmentation treatment of a PAH-polluted soil in a slurry bioreactor. Applied Sciences, 10(8), 2837 https://doi.org/10.3390/app10082837
58. Fuentes-Ramirez, A., Barrientos, M., Almonacid, L., Arriagada-Escamilla, C., & Salas-Eljatib, C. (2018). Respuesta a corto plazo de microorganismos del suelo, nutrientes y recuperación de plantas en bosques de Araucaria araucana afectados por incendios. Applied Soil Ecology , 131 , 99-106 https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.08.010
59. García-Carmona, M., Arcenegui, V., García-Orenes, F., & Mataix-Solera, J. (2020). The role of mosses in soil stability, fertility and microbiology six years after a post-fire salvage logging management. Journal of environmental management, 262, 110287 https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110287
60. García-Carmona, M., García-Orenes, F., Arcenegui, V., & Mataix-Solera, J. (2023). The recovery of Mediterranean soils after post-fire management: The role of Biocrusts and soil microbial communities. *Spanish Journal of Soil Science*, *13*, 11388 https://doi.org/10.3389/sjss.2023.11388.
61. García-Redondo, C., Díaz-Raviña, M., & Regos, A. (2024). Long-Term Cumulative Effects of Wildfires on Soil-Vegetation Dynamics in the “Baixa Limia–Serra do Xurés” Natural Park. Spanish Journal of Soil Science, 14, 13103 doi: 10.3389/sjss.2024.13103
62. Garcia-Pausas, J., Romanyà, J., y Casals, P. (2022). La recuperación de las funciones microbianas del suelo tras un incendio se ve favorecida por el crecimiento de las plantas. European Journal of Soil Science , 73 (4), e13290 https://doi.org/10.1111/ejss.13290
63. García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. Pastos y forrajes, 35(2), 125-138 https://surl.li/nfkntw
64. Gimeno-García, E., Andreu, V., & Rubio, J. L. (2005). Changes in organic matter, nitrogen, phosphorus and cations in soil as a result of fire and water erosion in a Mediterranean landscape. European journal of soil science, 51(2), 201-210 https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00310.x

65. Giraldo-Silva, A., Nelson, C., Barger, N. N., & Garcia-Pichel, F. (2019). Nursing biocrusts: isolation, cultivation, and fitness test of indigenous cyanobacteria. Restoration Ecology, 27(4), 793-803 https://doi.org/10.1111/rec.12920
66. (19) Google Scholar. (2023). *Google Scholar Metrics: h5-index* https://scholar.google.com/citations
67. Gómez-Sánchez, E., Lucas-Borja, M. E., Plaza-Álvarez, P. A., González-Romero, J., Sagra, J., Moya, D., & De Las Heras, J. (2019). Effects of post-fire hillslope stabilisation techniques on chemical, physico-chemical and microbiological soil properties in mediterranean forest ecosystems. Journal of environmental management, 246, 229-238 https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.150
68. Gonzáles, H., Ocaña, C. L., Cubas, J. A., Vega-Nieva, D. J., Ruíz, M., Santos, A., & Barboza, E. (2024). Impact of forest fire severity on soil physical and chemical properties in pine and scrub forests in high Andean zones of Peru. Trees, Forests and People, 18, 100659 https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100659
69. González, M. (2017). Impacto de los incendios forestales en suelos, agua y vegetación. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Recuperado de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/23945/2/Impacto+Incendio+Forestal.pdf
70. Grover, H. S., Bowker, M. A., Fulé, P. Z., Doherty, K. D., Sieg, C. H., & Antoninka, A. J. (2020). Post-wildfire moss colonisation and soil functional enhancement in forests of the southwestern USA. International Journal of Wildland Fire, 29(6), 530-540 https://doi.org/10.1071/WF19106
71. Guénon, R., & Gros, R. (2013). Frequent-wildfires with shortened time-since-fire affect soil microbial functional stability to drying and rewetting events. Soil Biology and Biochemistry, 57, 663-674 https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.07.006
72. Guerrero Barros, M. C. (2023). Efecto de los incendios sobre las condiciones del suelo de páramo en el Ecuador: una revisión sistemática.
73. Hedo, J., Lucas-Borja, ME, Wic, C., Andrés-Abellán, M., y De Las Heras, J. (2015). Propiedades microbiológicas del suelo y actividades enzimáticas de la recuperación a largo plazo post-incendio en rodales forestales sec6os y semiáridos de pino carrasco (Pinus halepensis M.). Solid Earth , 6 (1), 243-252 https://doi.org/10.5194/se-6-243-2015
74. Herrero, A., Stavans, J., & Flores, E. (2016). The multicellular nature of filamentous heterocyst-forming cyanobacteria. FEMS microbiology reviews, 40(6), 831-854 https://doi.org/10.1093/femsre/fuw029
75. Heydari, M., Faramarzi, M., & Pothier, D. (2016). Post-fire recovery of herbaceous species composition and diversity, and soil quality indicators one year after wildfire in a semi-arid oak woodland. Ecological Engineering, 94, 688-697 https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.032
76. Hinojosa, MB, Laudicina, VA, Parra, A., Albert-Belda, E., & Moreno, JM (2019). La sequía y su legado modulan la recuperación post-incendio de la funcionalidad del suelo y la estructura de la comunidad microbiana en un matorral mediterráneo. Global Change Biology , 25 (4), 1409-1427 https://doi.org/10.1111/gcb.14575
77. Hirsch, J. E. (2005). An index to quantify an individual's scientific research output. Proceedings of the National Academy of Sciences, 102(46), 16569–16572 https://doi.org/10.1073/pnas.0507655102
78. Hodges, T. M., & Lingwall, B. N. (2020, February). Laboratory study in the treatment of burned soils with microbial augmentation for Erosion control. In Geo-Congress 2020 (pp. 20-28). Reston, VA: American Society of Civil Engineers https://doi.org/10.1061/9780784482834.003
79. Hu, M., Wang, J., Lu, L., Gui, H., & Wan, S. (2023). Global recovery patterns of soil microbes after fire. Soil Biology and

Biochemistry, 183, 109057 https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109057

80. Huerta, S., Fernández-García, V., Calvo, L., & Marcos, E. (2020). Soil resistance to burn severity in different forest ecosystems in the framework of a wildfire. Forests, 11(7), 773 https://doi.org/10.3390/f11070773
81. Kim, E. J., Choi, S. D., & Chang, Y. S. (2011). Levels and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils after forest fires in South Korea. Environmental Science and Pollution Research, 18, 1508-1517 https://doi.org/10.1007/s11356-011-0515-3
82. Kim, Y. H., Kim, I. S., Moon, E. Y., Park, J. S., Kim, S. J., Lim, J. H., ... & Lee, E. J. (2011). High abundance and role of antifungal bacteria in compost-treated soils in a wildfire area. Microbial ecology, 62, 725-737 https://doi.org/10.1007/s00248-011-9839-2
83. Kukavskaya, E. A., et al. (2025). Fire and logging decrease soil CO_2 efflux in Siberian central taiga forests. Forests, 16(7), Article 1057. https://doi.org/10.3390/forests16071057
84. Li, H., Shu, Y., Wei, J., Zhao, P., Zhou, M., & Jia, W. (2024). Changes in the Soil Microbial Community Structure and Driving Factors during Post-Fire Recovery of the Larix gmelinii Rupr. Forest in Northern China. Forests, 15(4), 664 https://doi.org/10.3390/f15040664
85. Li, L., Zhao, C. C., Liu, Q. Y., & Zhang, Y. B. (2013). Isolation and genetic identification of dibenzothiophene degrading bacteria from contaminated soil. Advanced Materials Research, 610, 292-295 https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.610-613.292
86. Liu, P., Wen, S., Zhu, S., Hu, X., & Wang, Y. (2025). Microbial Degradation of Soil Organic Pollutants: Mechanisms, Challenges, and Advances in Forest Ecosystem Management. Processes, 13(3), 916 https://doi.org/10.3390/pr13030916
87. Liu, W., Zhang, Z., Li, J., Wen, Y., Liu, F., Zhang, W., ... & Han, X. (2023). Effects of fire on the soil microbial metabolic quotient: A global meta-analysis. *Catena*, *224*, 106957 https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106957
88. Lucas-Borja, M. E., Jing, X., Van Stan II, J. T., Plaza-Álvarez, P. A., Gonzalez-Romero, J., Peña, E., ... & de las Heras, J. (2022). Changes in soil functionality eight years after fire and post-fire hillslope stabilisation in Mediterranean forest ecosystems. Geoderma, 409, 115603 https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115603
89. Lucas-Borja, M. E., Delgado-Baquerizo, M., Muñoz-Rojas, M., Plaza-Álvarez, P. A., Gómez-Sanchez, M. E., González-Romero, J., ... & de las Heras, J. (2021). Changes in ecosystem properties after post-fire management strategies in wildfire-affected Mediterranean forests. Journal of Applied Ecology, 58(4), 836-846 https://doi.org/10.1111/1365-2664.13819
90. Mager, D. M. (2010). Carbohydrates in cyanobacterial soil crusts as a source of carbon in the southwest Kalahari, Botswana. Soil Biology and Biochemistry, 42(2), 313-318 https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.009
91. Marin, JA, Hernandez, T., & Garcia, C. (2005). Biorremediación de lodos de refinería de petróleo mediante landfarming en condiciones semiáridas: Influencia en la actividad microbiana del suelo. Environmental research , 98 (2), 185-195 https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.06.005
92. Mataix-Solera, J., Guerrero, C., García-Orenes, F., Bárcenas, G. M., & Torres, M. P. (2009). Forest fire effects on soil microbiology. In Fire effects on soils and restoration strategies (pp. 149-192). CRC https://doi.org/10.1201/9781439843338
93. Matos-Ortiz, A. (2024). *Use of Biopolymer to Remediate Wildfire Affected Soils* (Doctoral dissertation, University of Illinois at Chicago) https://indigo.uic.edu/articles/thesis/Use_of_

Biopolymer_to_Remediate_Wildfire_Affected_Soils/26110087
94. Memoli, V., Panico, S. C., Santorufo, L., Barile, R., Di Natale, G., Di Nunzio, A., ... & Maisto, G. (2020). Do wildfires cause changes in soil quality in the short term?. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(15), 5343 https://doi.org/10.3390/ijerph17155343
95. Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Antes, G., Atkins, D., ... & Tugwell, P. (2014). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. Revista Espanola de Nutricion Humana y Dietetica, 18(3), 172-181https://dx.doi.org/10.14306/renhyd.18.3.114.
96. Movasat, M., & Tomac, I. (2020). Evaluation and remediation of post-wildfire slope stability. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 205, p. 04007). EDP Sciences https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020504007
97. Moya, D., González-De Vega, S., Lozano, E., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Lucas-Borja, M. E., & de Las Heras, J. (2019). The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of Pinus halepensis Mill. stands in the short and mid-terms after wildfire. Journal of Environmental Management, 235, 250-256 https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.029
98. Mrozik, A., & Piotrowska-Seget, Z. (2010). Bioaugmentation as a strategy for cleaning up of soils contaminated with aromatic compounds. Microbiological research, 165(5), 363-375 https://doi.org/10.1016/j.micres.2009.08.001
99. Muñoz, M. D. M. (2016). Caracterización morfológica de 21 accesiones de *Capsicum spp*. del banco de germoplasma de la Universidad Nacional de Colo*mbia sede Palmira* (Doctoral dissertation).
100. Muñoz-Rojas, M., de Lima, N. M. M., Chamizo, S., & Bowker, M. A. (2021). Restoring post-fire ecosystems with biocrusts: living, photosynthetic soil surfaces. Current Opinion in Environmental Science & Health, 23, 100273 https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100273
101. Muñoz-Rojas, M., Erickson, T. E., Martini, D., Dixon, K. W., & Merritt, D. J. (2016). Soil physicochemical and microbiological indicators of short, medium and long term post-fire recovery in semi-arid ecosystems. Ecological indicators, 63, 14-22 https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.038
102. Muñoz-Rojas, M., Román, J. R., Roncero-Ramos, B., Erickson, T. E., Merritt, D. J., Aguila-Carricondo, P., & Cantón, Y. (2018). Cyanobacteria inoculation enhances carbon sequestration in soil substrates used in dryland restoration. Science of the Total Environment, 636, 1149-1154https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.265
103. Ngole-Jeme, V. M. (2019). Fire-induced changes in soil and implications on soil sorption capacity and remediation methods. *Applied Sciences*, *9*(17), 3447 https://doi.org/10.3390/app9173447
104. Nelson, C., Giraldo-Silva, A., & Garcia-Pichel, F. (2020). A fog-irrigated soil substrate system unifies and optimizes cyanobacterial biocrust inoculum production. Applied and environmental microbiology, 86(13), e00624-20 https://doi.org/10.1128/AEM.00624-20
105. Niza Costa, M., Gil, T., Teixeira, R., Rodrígues dos Santos, A. S., Rebelo Romão, I., Sequero López, C., & Vílchez, J. I. (2023). Combined Use of a Bacterial Consortium and Early-Colonizing Plants as a Treatment for Soil Recovery after Fire: A Model Based on Los Guájares (Granada, Spain) Wildfire. Biology, 12(8), 1093 https://doi.org/10.3390/biology12081093
106. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

107. Papin, J., Bartoli, C., Rojas, E. C., Coq, S., Gakière, B., Duplouy, H., Gautheron, N., Comte, G., & Hunault, G. (2024). Impact of inoculation frequency on inoculant survival and the native microbiota composition in agricultural soils. Scientific Reports, 14, 4135. https://doi.org/10.1038/s41598-024-54069-x
108. Pereira, P., Francos, M., Brevik, E. C., Ubeda, X., & Bogunovic, I. (2018). Post-fire soil management. Current Opinion in Environmental Science & Health, 5, 26-32 https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.002
109. Pérez-Valera, E., Verdú, M., Navarro-Cano, J. A., & Goberna, M. (2020). Soil microbiome drives the recovery of ecosystem functions after fire. Soil Biology and Biochemistry, 149, 107948 https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107948
110. Pizarro-Tobías, P., Fernández, M., Niqui, J. L., Solano, J., Duque, E., Ramos, J. L., & Roca, A. (2015). Restoration of a M editerranean forest after a fire: bioremediation and rhizoremediation field-scale trial. Microbial biotechnology, 8(1), 77-92 https://doi.org/10.1016/j.micres.2009.08.001
111. Pizarro-Tobías, P., Fernández, M., Niqui, J. L., Solano, J., Duque, E., Ramos, J. L., & Roca, A. (2015). Restoration of a M editerranean forest after a fire: bioremediation and rhizoremediation field-scale trial. Microbial biotechnology, 8(1), 77-92 https://doi.org/10.1111/1751-7915.12138
112. Preenan, N., Beskers, N., & Gibson, K. (2023). Cellulose-Based Hydrogel Capsules to Address Soil Erosion Following Wildfire: A One Health Action Plan. One Health Innovation, 1(2) https://doi.org/10.24908/ohi.v1i2.16617
113. Rafie, S. A. A., Blentlinger, L. R., Putt, A. D., Williams, D. E., Joyner, D. C., Campa, M. F., ... & Hazen, T. C. (2024). Impact of prescribed fire on soil microbial communities in a Southern Appalachian Forest clear-cut. Frontiers in Microbiology, 15, 1322151 https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1322151
114. Rafie, S. A. A., Blentlinger, L. R., Putt, A. D., Williams, D. E., Joyner, D. C., Campa, M. F., ... & Hazen, T. C. (2024). Impact of prescribed fire on soil microbial communities in a Southern Appalachian Forest clear-cut. Frontiers in Microbiology, 15, 1322151. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1322151
115. Raiesi, F., & Pejman, M. (2021). Assessment of post-wildfire soil quality and its recovery in semi-arid upland rangelands in Central Iran through selecting the minimum data set and quantitative soil quality index. Catena, 201, 105202 https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105202
116. Rawat, D., Khanduri, V. P., Sati, S. P., Ahmad, T., Riyal, M., & Mishra, P. (2020). Impact of forest fire on soil quality and resilience potential: a review. ADRRI Journal of Agriculture and Food Sciences, 4(6 (4)), 59-81: https://www.journals.adrri.org/
117. Rodríguez, J. D. B. Evaluación de los efectos producidos por los incendios forestales sobre la viabilidad y germinación del banco de semillas del bosque seco tropical.
118. Rodríguez, M. B., Zafra, S. L., & Ortega, S. P. Q. (2015). La revisión sistemática de la literatura científica y la necesidad de visualizar los resultados de las investigaciones. Revista Logos, Ciencia & Tecnología, 7(1), 101-103Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=517751487013
119. Román, J. R., Chamizo, S., Roncero-Ramos, B., Adessi, A., De Philippis, R., & Cantón, Y. (2021). Overcoming field barriers to restore dryland soils by cyanobacteria inoculation. Soil and tillage research, 207, 104799 https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104799
120. Román, J. R., Chilton, A. M., Cantón, Y., & Muñoz-Rojas, M. (2020). Assessing the viability of cyanobacteria pellets for application in arid land restoration. Journal

of Environmental Management, 270, 110795 https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110795

121. Roncero-Ramos, B., Román, J. R., Gómez-Serrano, C., Cantón, Y., & Acién, F. G. (2019). Production of a biocrust-cyanobacteria strain (Nostoc commune) for large-scale restoration of dryland soils. Journal of Applied Phycology, 31, 2217-2230 https://doi.org/10.1007/s10811-019-1749-6
122. Rossi, F., Li, H., Liu, Y., & De Philippis, R. (2017). Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal. Earth-Science Reviews, 171, 28-43 https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.05.006
123. Samaniego, J., Lorenzo, S., Toro, E. R., Krieger Merico, L. F., Herrera Jiménez, J., Rouse, P., & Harrison, N. (2022). Soluciones basadas en la naturaleza y remoción de dióxido de carbono https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/57645
124. Samdaliri, H., Jourgholami, M., Salajegheh, A., Abdi, E., & Kooch, Y. (2021). The effect of forest fires on the dynamics of some soil physical, chemical and biological characteristics over time. Iranian Journal of Forest, 13(2), 129-140 10.22034/ijf.2021.136935
125. Schirrmeister, B. E., de Vos, J. M., Antonelli, A., & Bagheri, H. C. (2013). Evolution of multicellularity coincided with increased diversification of cyanobacteria and the Great Oxidation Event. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(5), 1791-1796 https://doi.org/10.1073/pnas.1209927110
126. She, R., Li, J. C., Zhang, X., Yang, Y. Q., Zhou, F. P., Fornacca, D., ... & Xiao, W. (2024). Heat input determines the response and rapid recovery of post-fire soil microbial biomass. International Journal of Wildland Fire, 33(4) https://doi.org/10.1071/WF23095
127. Silva, F. C., Vieira, D. C., van der Spek, E., & Keizer, J. J. (2019). Effect of moss crusts on mitigation of post-fire soil erosion. Ecological Engineering, 128, 9-17 https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.024
128. Singh, J. S., Kumar, A., Rai, A. N., & Singh, D. P. (2016). Cyanobacteria: a precious bio-resource in agriculture, ecosystem, and environmental sustainability. Frontiers in microbiology, 7, 529 https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00529
129. Singh, D., Sharma, P., Kumar, U. et al. Effect of forest fire on soil microbial biomass and enzymatic activity in oak and pine forests of Uttarakhand Himalaya, India. Ecol Process 10, 29 (2021). https://doi.org/10.1186/s13717-021-00293-6
130. Singleton, M. P., Thode, A. E., Meador, A. J. S., & Iniguez, J. M. (2019). Increasing trends in high-severity fire in the southwestern USA from 1984 to 2015. Forest ecology and management, 433, 709-719 https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.039
131. Smith, J. E., Kluber, L. A., Jennings, T. N., McKay, D., Brenner, G., & Sulzman, E. W. (2017). Does the presence of large down wood at the time of a forest fire impact soil recovery?. Forest Ecology and Management, 391, 52-62 https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.013
132. Schwab, A. P. (2024). Bioremediation of Polyaromatic Hydrocarbons in Soils: A Review of Recent Progress. Current Pollution Reports, 10(4), 710-721 https://doi.org/10.1007/s40726-024-00324-8
133. Vergnoux, A., Malleret, L., Asia, L., Doumenq, P., & Theraulaz, F. (2011). Impact of forest fires on PAH level and distribution in soils. Environmental research, 111(2), 193-198 https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.01.008
134. Verma, S., & Jayakumar, S. (2012). Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A review. proceedings of the International Academy of

Ecology and Environmental Sciences, 2(3), 168

135. Vila-Escalé, M., Vegas-Vilarrúbia, T., & Prat, N. (2007). Release of polycyclic aromatic compounds into a Mediterranean creek (Catalonia, NE Spain) after a forest fire. Water Research, 41(10), 2171-2179 https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.029
136. Vourlitis, G., Steinecke, D., Martinez, T., Konda, K., Rendon, R., Hall, V., ... & Sethuraman, A. (2022). El manejo de incendios y postincendios altera la abundancia y actividad microbiana del suelo: un estudio de caso en suelos de matorrales semiáridos. Applied Soil Ecology , 171 , 104319 https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104319
137. Ward, M., Tulloch, A. I., Radford, J. Q., Williams, B. A., Reside, A. E., Macdonald, S. L., ... & Watson, J. E. (2020). Impact of 2019–2020 mega-fires on Australian fauna habitat. Nature Ecology & Evolution, 4(10), 1321-1326. https://doi.org/10.1038/s41559-020-1251-1
138. Warren, S. D., Clair, L. L. S., Johansen, J. R., Kugrens, P., Baggett, L. S., & Bird, B. J. (2015). Biological soil crust response to late season prescribed fire in a Great Basin juniper woodland. Rangeland ecology & management, 68(3), 241-247 https://doi.org/10.1016/j.rama.2015.03.007
139. Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R., & Swetnam, T. W. (2006). Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. science, 313(5789), 940-943 DOI: 10.1126/science.112883
140. Xue, L., Li, Q., & Chen, H. (2014). Effects of a wildfire on selected physical, chemical and biochemical soil properties in a Pinus massoniana forest in South China. Forests, 5(12), 2947-2966 https://doi.org/10.3390/f5122947
141. Yao, L., Teng, Y., Luo, Y., Christie, P., Ma, W., Liu, F., ... & Li, Z. (2015). Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by Trichoderma reesei FS10-C and effect of bioaugmentation on an aged PAH-contaminated soil. *Bioremediation Journal*, *19*(1), 9-17 https://doi.org/10.1080/10889868.2014.939137
142. Zeneli, A., Kastanaki, E., Simantiraki, F., & Gidarakos, E. (2019). Monitoring the biodegradation of TPH and PAHs in refinery solid waste by biostimulation and bioaugmentation. Journal of environmental chemical engineering, 7(3), 103054 https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103054
143. Zhou, H., Yang, M., Luo, X., Yang, Z., Wang, L., Liu, S., ... & Li, Y. (2024). Short-Term Impacts of Fire and Post-Fire Restoration Methods on Soil Properties and Microbial Characteristics in Southern China. Fire, 7(12), 474. https://doi.org/10.3390/fire7120474
144. Zhou, X., Zhao, Y., Belnap, J., Zhang, B., Bu, C., & Zhang, Y. (2020). Practices of biological soil crust rehabilitation in China: experiences and challenges. Restoration Ecology, 28, S45-S55 https://doi.org/10.1111/rec.13148

10. ANEXOS

Anexo (1). Matriz extracción de datos. Contiene los estudios seleccionados en la revisión sistemática, incluyendo autor/año, título del estudio, tipo de estudio, contexto del estudio, metodología y resultados principales, potencial de aplicación y calidad de la publicación.

Tabla 2. Matriz extracción de datos. Matriz de extracción de datos

Estudio	Título del estudio	Tipo de estudio	Contexto del estudio	Metodología	Resultados principales	Potencial de aplicación	Calidad de la publicación
Autor/a y Año	Título de la publicación	Ejemplo: Experimental	Ejemplo: Suelos incendiados	Ejemplo: Estudio de campo	hallazgos encontrados en el estudio	Relevancia y utilidad	Alta Media Baja

Anexo 2. Matriz propiedades biológicas del suelo. Nombra los factores estimados como los parámetros biológicos clave como biomasa microbiana, actividad enzimática y respiración basal, su unidad de medida, importancia en la evaluación del suelo, método de análisis y relevancia en suelos degradados.

Tabla 3. Matriz propiedades biológicas del suelo. Matriz propiedades biológicas del suelo

Estudio	Parámetro	Unidad de medida	Importancia en la evaluación del suelo	Métodos de análisis	Importancia en suelos degradados y afectados por incendios
Cárdenas Ortiz et al., 2015	Biomasa microbiana	mg C/kg suelo	Indicador de la actividad biológica del suelo.	Fumigación-extracción	Disminuye drásticamente tras un incendio, afectando los ciclos de nutrientes y la recuperación del ecosistema.
Rafie et al. (2024)	pH	UND	Influye en la disponibilidad de nutrientes y actividad microbiana.	Potenciómetro, electrodos de vidrio	Los incendios suelen aumentar el pH debido a la presencia de cenizas alcalinas, afectando la solubilidad de los nutrientes.

Anexo 3. Matriz de especies microbianas con potencial biorremediador. Presenta los géneros y algunas especies bacterianas, fúngicas y cianobacterias identificados en la investigación, su tipo, mecanismos de acción en la biorremediación, los contaminantes degradados y/o nutrientes fijados y resultados en la restauración de suelos.

Tabla 4. Matriz determinación del potencial de biorremediación que tienen los microorganismos para restaurar los suelos afectados por incendios.

Estudio	Microorganismo(s)	Tipo (Bacteria / Hongo / Actinomiceto)	Mecanismo de acción en la biorremediación	Contaminantes degradados / Nutrientes fijados	Evidencia en la restauración de suelos
Pizarro et al., 2015	*Rhizobium spp.*	Bacteria	Fijación de nitrógeno	N2 → NH3 (asimilable por plantas)	Regeneración del nitrógeno en suelos pobres después del fuego
Chaudhary et al. (2020)	Micorrizas	Hongo	Asociación simbiótica con raíces, mejora la	Fósforo, nitrógeno	Reforestación de suelos degradados

			absorción de nutrientes		
Andreolli et al. (2015, 2021)	*Trichoderma sp.* y otras cepas microbianas nativas	Hongos	Bioestimulación y bioaumento para degradación de contaminantes hidrocarburados post incendio	Degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y metales pesados. Fijación de N	Restauración y estabilización de la calidad biológica y química del suelo, reduciendo la toxicidad y permitiendo su recuperación ecológica y funcional.
Pizarro-Tobías et al. (2015)	*Pseudomonas putida* + consorcio micorrízico (Hongos y bacterias)	Bacterias y hongos	Bioaumentación con cepas de P. putida y consorcios microbianos nativos.	Degradación de hidrocarburos aromáticos monoaromáticos y policíclicos (PAHs)	Restauración de las condiciones del suelo momentos previos al incendio, destacando la eficacia de la rizorremediación
Liu et al. (2025)	Diversas comunidades microbianas del suelo (bacterias, hongos, actinomicetos)	Bacterias / Hongos / Actinomicetos	Bioaumentación, la bioestimulación, la fitorremediación y el uso de sistemas microbianos-electroquímicos	Degradación de (COPs), hidrocarburos de petróleo, productos farmacéuticos y (COVs)	Estrategias microbianas avanzadas para la remediación de suelos forestales contaminados

Anexo 4. Matriz sobre las características y aplicaciones de bioformulados microbianos utilizados en suelos post-incendios. Esta matriz describe los tipos de bioformulados, su composición microbiana, método de aplicación, contexto experimental, resultados reportados y limitaciones expuestas en cada estudio.

Tabla 5. Matriz análisis de las características y aplicaciones de bioformulados microbianos en restauración de suelos incendiados.

Estudio	Tipo de bioformulado	Composición microbiana	Método de aplicación	Contexto de uso (campo/lab/invernadero)	Resultados reportados	Limitaciones o desafíos
García-Carmona et al., (2023)	Biofertilizante sólido	comunidades bacterianas y fúngicas adaptadas al biocrust.	Aplicación directa al suelo	Suelos mediterraneo	Aceleración recuperación microbiana y estabilización del suelo.	Biocrust sensible a alteraciones físicas y climáticas.